

大型遠心せん断土槽実験に基づく群杭基礎の強震時応力特性評価

藤 森 健 史 栗 本 修
若 松 邦 夫

Stress Characteristics of Pile Group during Earthquake based on Centrifuge Large Shear Box Shaking Table Tests

Takeshi Fujimori Osamu Kurimoto
Kunio Wakamatsu

Abstract

Experimental investigations were performed to determine the stress characteristics of a pile group during an earthquake for a general building based on centrifuge large shear box shaking table tests (model area: 100×50×27.5m, input motion: above the Kobe Earthquake of 1995). Some interesting results were obtained, and a reduction in pile stress by using a footing beam was indicated. Simulation analyses showed good agreement with experimental results, and the applicability of the analytical method for aseismic design was verified.

概 要

基礎構造の耐震設計においては、“静的から動的”、“上部構造との一体解析”、“大地震対応”をキーワードとしたより高度な方法が要求される傾向にある。一方、大地震時の杭基礎の挙動については未解明な点が多く、検証データも不十分な状況にある。これらの状況を鑑み、一般的な建築構造物の強震時の群杭応力特性に関して、1)構造物全体のモデル化、2)広域な地盤領域のモデル化、3)阪神大震災と同等以上の極大地震入力、を特長とする大型遠心せん断土槽実験を実施し、諸検討を行った。それらより、1)極大地震時においても建築構造物基礎梁部分の地震力負担が杭本体の負担応力低減に貢献している可能性があること、2)ペンゼン型モデルにより評価した杭応力は実験結果とおおむね整合すること、3)地盤非線形性を試験結果によらず、建築基準法別表値によった場合、上部建物応答値にはあまり影響しないが、杭応力評価には若干の影響を与えること等の結果を得た。

1. はじめに

基礎構造の耐震設計においては、建築基礎構造設計指針¹⁾の改定により、“静的から動的”、“上部構造との一体解析”、“大地震対応”をキーワードとしたより高度な設計法が要求される傾向にある。従来の杭基礎の耐震設計法は、杭を弾性支承梁とし杭頭慣性力を与える方法を基本とするが、耐震設計のグレードに応じて、地盤変位の影響も取り入れた応答変位法²⁾や上部構造との一体解法であるペンゼン型モデル³⁾、杭基礎一構面のフレームモデルによる静的増分解析⁴⁾等が用いられることもある。これらの手法を用いることにより、地盤震動の影響、上部構造との連成振動の影響、動的効果、杭位置や軸力変動の効果等を考慮できるが、例えば、応答変位法は簡易であるが慣性力の影響と地盤震動の影響が別々に評価されること等、ペンゼン型モデルは上部構造との一体モデルとして動的効果を考慮できるが基本的に一本杭としてまとめて応力評価されること等、フレームモデルによる静的増分解析は杭位置の影響等が評価されるが静的解析であること等、各々、長所と短所を有する。一方、実現象について鑑みると、特に、大地震時において、各杭や杭以外の地中梁等の地下構造体がどのように応力を負担しているかについて未だ不明な点が多く、例えば、一本杭として集約されたペンゼン型モデルにおける杭応力を

どのように各杭応力に置き換えるべきかというような問題について十分な方向づけがなされておらず、耐震設計法として導入する上での課題となっているとともに、耐震設計合理化への余地を残している状況にあるといえる。これらの課題に関しては、1G場における大型せん断土槽や遠心場におけるせん断土槽を用いた実証的研究例^{5),6)}があるが、1G場においては上載圧設定や構造物全体のモデル化が困難であり、遠心場においても従来の実験例では装置の性能に対応して地震力や地盤のモデル化範囲等が限定される状況にある。

本研究では、これらの状況を鑑み、一般的な建築構造物の強震時群杭応力特性に関する大型遠心せん断土槽実験を行った。せん断土槽の大きさは約2×1×0.55m(遠心力50G)であり、平面100×50m深さ27.5mの地盤に建つ3×4本杭支持10階建建築構造物をモデル化し、阪神大震災と同程度以上の地震波加振とそのシミュレーション解析を行った。これらにより、強震時の群杭応力特性や基礎梁と杭の応力分担特性、用いた解析手法の耐震設計法としての適用性等について、若干の考察を行った。

2. 地震波加振実験概要

2.1 実験方法

大型遠心せん断土槽による一般建築構造物模型の地震

波加振実験である。第2種地盤相当の地盤と杭支持層の2層をモデル化した。建物模型は、構造物の一構面や平面部分を取り出してモデル化したものではなく、構造物全体をモデル化したものである。加振は、小地震、中地震、建築基準法における損傷限界地震、安全限界地震、極大地震の各地震波加振を行ったが、ここでは小地震と極大地震の結果について示した。計測は、各杭のひずみ、建物加速度、地盤加速度等について行った。なお、以降、注釈等がない限り、基本的に、実現象との対応を考慮して、相似則を考慮した1G場相当スケール(長さ,変位:50倍,速度:1倍,加速度:1/50,時間,周期50倍,振動数:1/50)にて記述した。

2.2 模型概要

模型概要をFig.1に示す。建物は、平面12×18mの一般的な地下階のない10階建築構造物であるが、高さは1次モードに対応した等価高さとした。また、上部構造柱は4本とし、相当する固有振動数となるように断面を調整した。基礎梁もスパン毎にモデル化した。基礎梁せいは2.5mである。杭は、500 20tの鋼管杭とし、杭頭を地中梁に固定した。杭先端部は、支持力を確保するために場所打杭とした場合の杭径(1400)に相当する鋼製の円盤を取り付けた。杭長は20mで、先端部2.5mを支持層に根入れた。なお、上部建物の柱脚固定時の固有振動数は、同条件による自由振動加振実験により確認した。加振実験の結果得られた柱脚固定時の自由振動波形をFig.2に示す。Fig.2より、柱脚固定固有振動数は1.52Hz(0.66s)であり、10階建RC建物としてほぼ妥当な値であることを確認した($T=0.02 \cdot h$; T:周期, h;高さ)。また、Fig.2の波形から逆算して求めた上部建物の減衰定数は1%である。

地盤は、空中落下法により作成した乾燥砂地盤(8号ケイ砂,Dr50%)である。Vsは、微小振動レベルにおける伝達関数から上載圧を考慮して逆算評価した(Fig.3)。その結果、平均Vsは127m/s(64~151m/s)となった。また、密度は1.3t/m³である。杭支持基盤は、モルタル混合砂により作成した。材料試験結果より、Vsは533m/s,密度は1.7t/m³である。

2.3 入力地震動

入力地震動は建築基準法における損傷限界・安全限界スペクトル(告示波スペクトル⁷⁾に対応した模擬地震波とした。このとき、小地震は安全限界地震の1/20、極大地震は安全限界地震の1.5倍の大きさとした。小地震の最

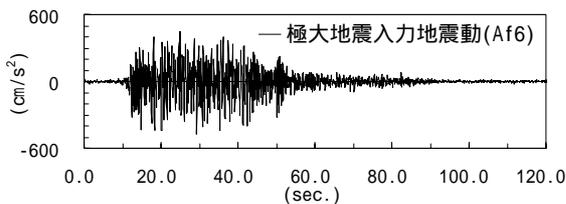
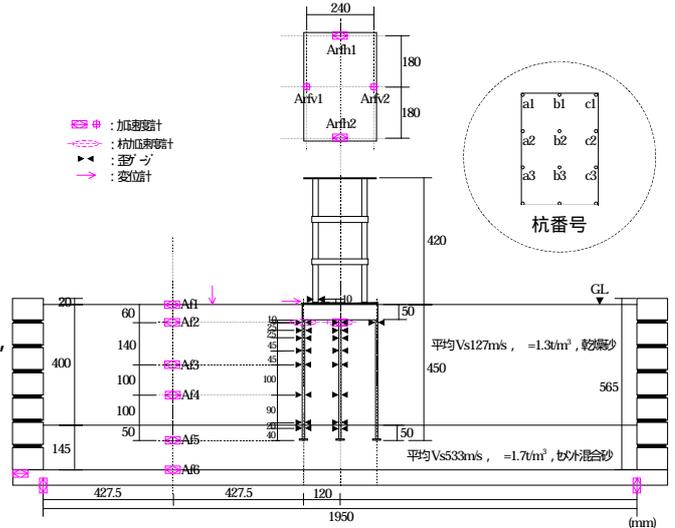


Fig. 4 入力地震波
Input Motion



注)図中の寸法は実スケール
Fig. 1 模型概要
Outline of Test Model

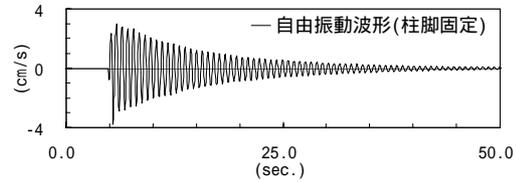


Fig. 2 柱脚固定時の自由振動波形
Free Vibration Test for Superstructure

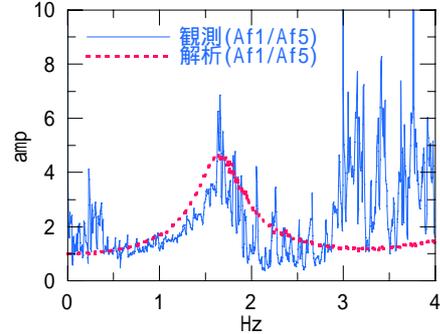
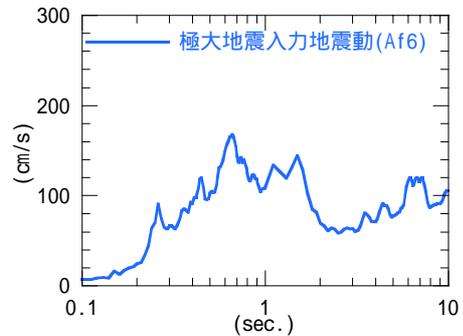


Fig. 3 自由地盤の伝達関数
Transfer Function of Free Field



(b) Great earthquake
Fig. 5 入力地震波の速度応答スペクトル(h=0.05)
Response Spectrum of Input Motion

大加速度は20gal、極大地震の最大加速度は470galである。代表例として、極大地震入力地震波をFig.4に、その速度応答スペクトルをFig.5に示す。極大地震時のスペクトルは、工学的基盤レベル相当の入力スペクトルとして120cm/s前後の値となっており、極めて大きな地震入力であることを確認できる。

3. 地震波加振実験結果

3.1 地盤と上部建物の応答

小地震時の建物頂部と地表面の速度応答スペクトルをFig6(a)に示す。0.7秒付近に地盤の線形1次卓越周期のピークを確認できる。また、0.77秒付近に地盤-建物連成系の線形1次卓越周期のピークを確認できる。また、極大地震時の建物頂部と地表面の速度応答スペクトルをFig6(b)に示す。非線形性による各部の剛性低下の結果、地盤と地盤-建物連成系の卓越周期はともに1.4秒付近に現れている。また、地表面スペクトルは300cm/sを超えており、阪神大震災時に最も大きな記録が得られた点の一つである神戸海洋気象台や葺合の応答値⁸⁾に対して同等以上の値となっている。

3.2 杭応力と基礎梁の効果

各杭の地震時最大曲率分布をFig.7に示す。小地震時、極大地震時ともに、杭位置によって杭頭部の最大曲率の大きさに若干のばらつきが認められる。小地震時には、a1杭とb1杭の杭頭曲率がやや小さい。これは、これらの杭の杭頭固定度が他に比べてやや低かったためと推察される。また、極大地震時には、b2杭の曲率がやや大きい。これは、各杭頭部が降伏モーメント前後の応力状態にあるなかで、b2杭頭部のみが明確に塑性域に達したためである。従って、モーメント分布にすればこの差はほとんどなくなる。また、特に、コーナー杭や端杭の曲率が大きくなるような傾向は認められなかった。これは、杭間隔が杭径の12倍と広いため、群杭効果が出にくい状況にあったためと推察される。また、極大地震時のほうが、小地震時より若干深い位置で地中部における曲率の極大値が表れているものの、全体的な分布形状の差異はさほど大きくないようである。なお、縁応力が降伏応力に達した時のモーメント、曲率と終局モーメントから定まる曲率を折点としたバイリニア型⁹⁾のM-関係⁹⁾を仮定すると、極大地震時の最大塑性率は、b2杭頭部で1.63である。

次に、基礎梁の応力負担状況を確認するために、基礎梁周辺の砂を剥ぎ取った状態で同様の加振を行い、それぞれの結果を比較した。それらをFig.8に示す。これらの結果より、基礎梁が応力を負担しないと、小地震時の杭頭で2~3倍の、小地震時の地中部で1~1.3倍の、極大地震時の杭頭で1.5倍程度の、極大地震時の地中部で3倍程度の、杭最大曲率が発生していることを確認できる。これにより、表層地盤の剛性が低下している極大地震時に

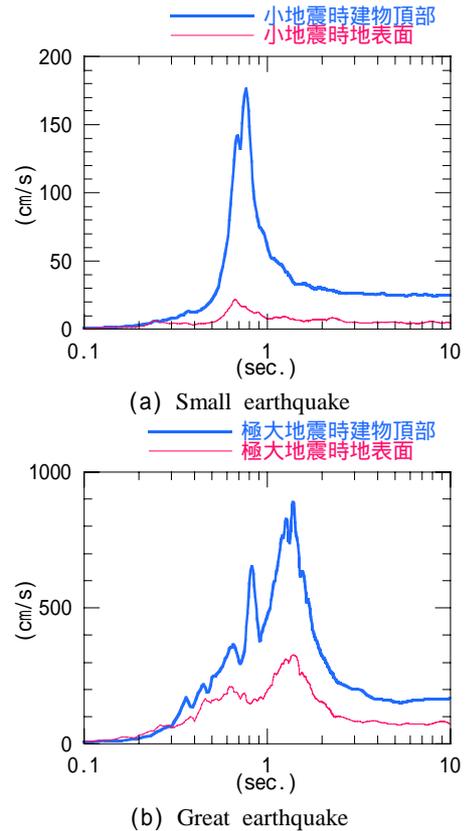
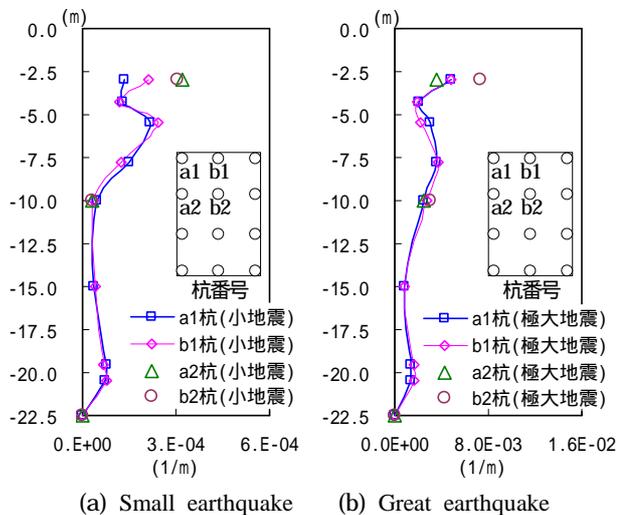


Fig. 6 速度応答スペクトル(h=0.05)
Response Spectrum (Superstructure, Ground Surface)



(a) Small earthquake (b) Great earthquake
Fig. 7 杭最大曲率分布
Distribution of Maximum Curvature

においても、基礎梁はかなりの地震力を負担しており、杭本体の負担応力の低減に貢献していることがうかがわれる。なお、極大地震時の基礎梁周辺の砂を剥ぎ取った状態の上部建物頂部応答の最大加速度は1039gal、基礎応答の最大加速度は611galであり、剥ぎ取らない状態のそれら(建物頂部904gal、基礎562gal)に比べて大きな差はなかった。この結果より、極大地震時には、基礎梁周辺の砂を剥ぎ取った状態と剥ぎ取らない状態で、上部建物慣性力の大きさに、杭曲率分布に見られるほどの差

はなかったと考えられる。また、代表例としてコーナー杭の結果を比較して示したが、他の杭についてもおおむね同様の結果を得ている。

4. シミュレーション解析と解析法の適用性

4.1 解析方法

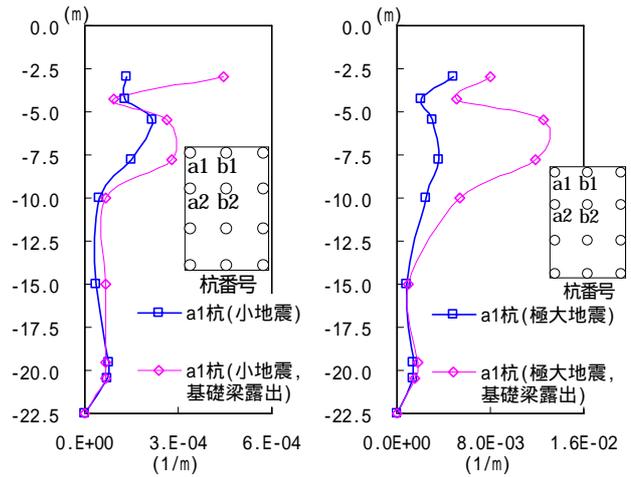
実験結果のシミュレーション解析をペンゼン型モデルにより行った。ペンゼン型モデルは、杭応力評価において、各杭を一本杭としてまとめて評価するものの、上部構造や地盤の影響を一体モデルとして比較的簡易に動的評価できるため、今後の杭耐震設計に適用されるべき有効な解析手法のひとつである。ここでは、実験結果の分析・確認とともに、今後の杭耐震設計への適用性について検討することを目的として、同モデルを解析手法として選定した。

ここで用いたペンゼン型モデルは、フルマトリクス of 精算地盤ばね値を対角マトリクスとバンドマトリクスに縮約し、地盤ばね・ダッシュポット値と周辺地盤土柱の設定に用いることで、精算解に近い結果を得られるように配慮したモデル^{9),10)}である。解析モデルの概要をFig.9に示す。上部建物は、等価せん断型モデルとした。せん断剛性は、Fig.2の自由振動波形より得られた柱脚固定1次固有振動数となるように設定した。減衰定数も同様にFig.2の結果から1%に設定した。非線形性は、バイリニア型とした。基礎梁部分は剛体とした。杭は、曲げ剛性が等価となるように1本のビームに集約した。非線形性は、縁応力が降伏応力に達した時のモーメント、曲率と終局モーメントから定まる曲率を折点としたバイリニア型のモデルでM - 関係を簡易化して表わした。周辺地盤と自由地盤の初期地盤物性値は、Fig.3により定めたとおりである。非線形性は、R - Oモデルとした。基準ひずみ_{0.5}と最大減衰定数hmaxは、異なる上載圧で数ケース行った三軸動的変形試験結果により、地盤深さ毎に上載圧を考慮して設定した。地盤ばねと地盤ダッシュポットの設定法は前述のとおりである。非線形性は、地盤と同様のR - Oモデルであり、剛性低下率も同じ深さレベルの地盤のそれと同じとした。

4.2 解析結果

実験結果と解析結果の応答波形を比較してFig.10に、速度応答スペクトルを比較してFig.11,12に示す。ここでは、代表例として、建物頂部の波形の比較と、建物頂部と地表面の速度応答スペクトル(h=5%)の比較を示した。遠心装置やせん断土槽の特性に係わる雑振動が若干発生しているため、観測結果のスペクトルの短周期側に不整合な増幅傾向が見受けられ、この影響で加速度波形も実験結果のほうがやや大きくなっている。しかしながら、全体的には、小地震時も極大地震時も実験結果と解析結果は概ね整合している。

実験結果と解析結果の杭最大曲率分布を比較してFig.



(a) Small earthquake (b) Great earthquake

Fig. 8 杭最大曲率分布(基礎梁の影響)

Distribution of Maximum Curvature(Effects of Footing Beam)

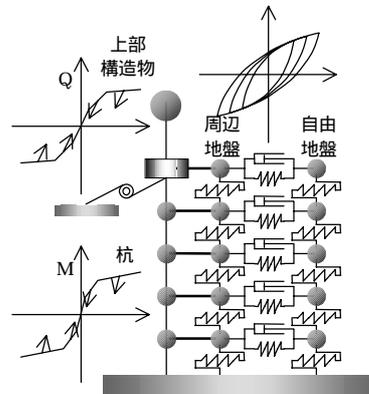
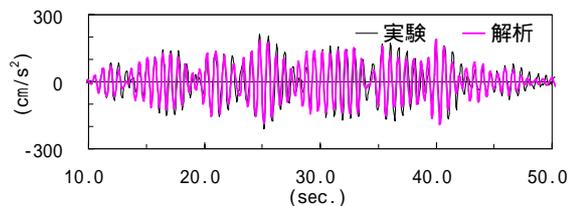
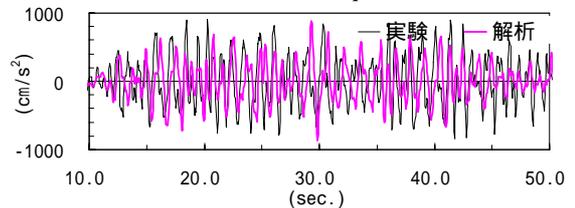


Fig. 9 解析モデル
Analytical Model



(a) Small earthquake



(b) Great earthquake

Fig. 10 応答波形(建物頂部(Arf))
Time History of Acceleration

13に示す。小地震時、極大地震時も実験結果と解析結果はおおむね整合している。小地震時において、実験結果のa1,b1杭頭部の曲率がやや小さくその分-5m付近の曲率がやや大きい。これは、前述したとおりこれらの杭の杭頭固定度が他の杭に比べてやや低いことに起因す

ると考えられる。極大地震時は、反力負担の大きい固定度の高い杭から塑性化しているため、固定度が曲率に及ぼす差異は潜在化している。一方、極大地震時では、各杭頭部が降伏モーメント前後の応力状態にあるなかで、b2杭頭部のみが明確に塑性域に達したため、b2杭頭部の曲率がやや大きくなっているが、これも前述のとおりモーメント分布ではほとんど差が生じない。これらの結果より、今回のように群杭効果が小さいケースにおいては、ペンゼン型モデルのように杭を一本に集約したモデルでも強震時の杭応力評価をおおむね適切にできると考えられるが、実際の建築構造物は、今回の実験ケースより杭が密なケースが多いので、更なる検討も必要である。

4.3 解析法の適用性

ここでは、シミュレーション解析で用いたペンゼン型モデルの耐震設計への適用性について、地盤定数設定に着目した若干の検討を行った。

前述のシミュレーション解析では、実験結果と解析結果はおおむね整合した。このとき、地盤のS波速度は実験結果から逆算推定し、その非線形性は三軸動的変形試験結果によった。実務設計では、S波速度は得にくいもののN値等から概略推定できる。しかしながら、通常、三軸動的変形試験は行われず、地盤の非線形性に関する情報を得ることは難しい。この場合、建築基準法の別表値¹¹⁾で代用することがまず考えられる。前節の解析におけるその他の定数値については、実務設計でも概略得られると考えられるので、得ることが難しい地盤非線形性に係わる定数値、即ち、R-Oモデルにおける基準ひずみ $\epsilon_{0.5}$ と最大減衰定数hmaxを建築基準法の別表値によった場合の影響について検討した。

解析は、前述のシミュレーション解析(解析1)に加え、基準ひずみ $\epsilon_{0.5}$ と最大減衰定数hmaxの両方を砂質土の場合の建築基準法別表値、即ち、 $\epsilon_{0.5}=4.0 \times 10^{-4}$ 、hmax=0.277としたケース(解析2)、最大減衰定数hmaxのみ同別表値とし基準ひずみ $\epsilon_{0.5}$ は三軸動的変形試験結果によったケース(解析3)、基準ひずみ $\epsilon_{0.5}$ のみ同別表値とし最大減衰定数hmaxは三軸動的変形試験結果によったケース(解析4)の3ケースを追加して行った。ただし、解析4の結果は、解析2とほとんど変わらなかったため、解析2,3の結果を以下に示した。

解析2,3による上部建物頂部における応答波形の速度応答スペクトルを前節のシミュレーション解析結果(解析1)によるそれと比較してFig.14に示す。Fig.14の結果より、各解析結果間の差異はほとんどなく、地盤非線形性に関する定数を建築基準法の別表値によっても、上部建物の応答に関しては、差し支えないことがうかがわれる。次に、解析2,3による結果と実験結果の杭最大曲率分布を比較して、Fig.15に示す。Fig.15の結果より、基準ひずみ $\epsilon_{0.5}$ と最大減衰定数hmaxの両方を建築基準法別表値によった解析2の結果は、実験結果との差異がやや目立つが、最大減衰定数hmaxのみ同別表値とした解析3の

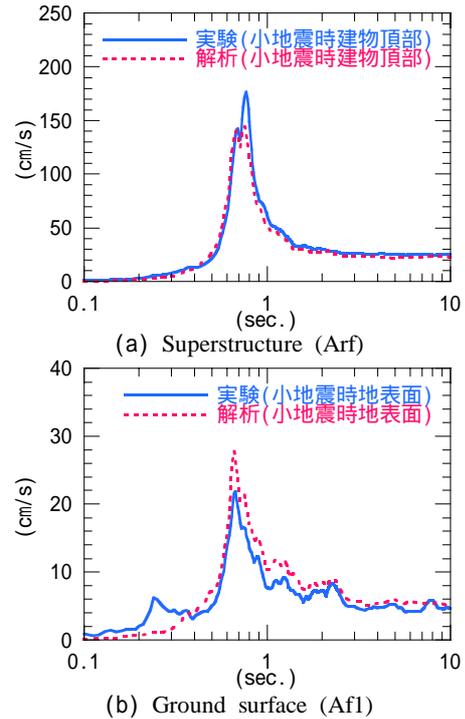


Fig. 11 速度応答スペクトル(小地震)
Response Spectrum (Small Earthquake)

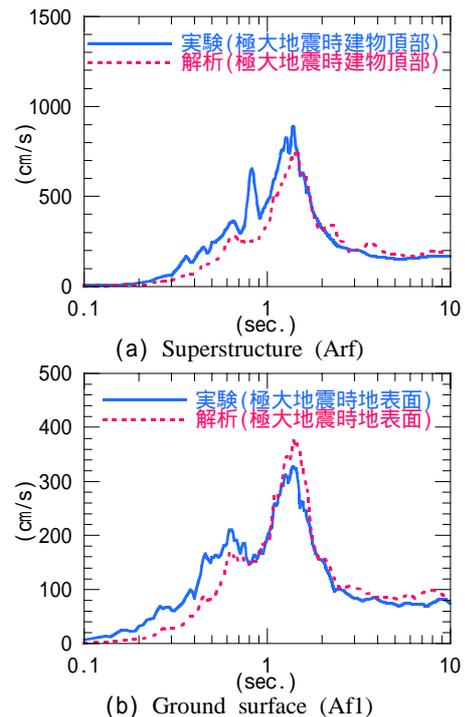


Fig. 12 速度応答スペクトル(極大地震)
Response Spectrum (Great Earthquake)

結果は、前節の解析1同様に実験結果におおむね整合していることを確認できる。これらの結果より、基準ひずみ $\epsilon_{0.5}$ のみ同別表値とした解析4の結果も解析2とほぼ同様であることを鑑みると、杭応力評価に関しては、最大減衰定数hmaxについては建築基準法の別表値によっても差し支えないが、基準ひずみ $\epsilon_{0.5}$ を建築基準法の別表値による場合はやや注意が必要であると考えられる。

5. まとめ

一般的な建築構造物の強震時の群杭応力特性に関して、以下の特長を有する大型遠心せん断土槽実験を行った。

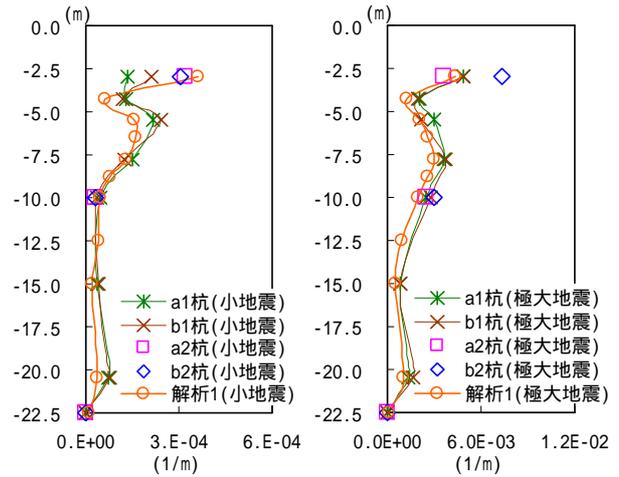
- 1) 一構面や平面部分を取り出したモデル化ではなく、構造物全体のモデル化(3×4本杭)。
- 2) 広域な地盤モデル化領域(平面100×50m深さ27.5m)。
- 3) 地表面の応答スペクトルが300cm/sを超える阪神大地震災と同等以上の極大地震入力。

実験結果の分析やシミュレーション解析等により以下の結果を得た。

- 1) 極大地震時においても地下階を有しない一般的な建築構造物の基礎梁部分が、かなりの地震力を負担しており、杭本体の負担応力の低減に貢献している可能性がある。
- 2) 各杭を1本に集約したペンゼン型モデルにより評価した杭最大曲率分布は実験結果とおおむね整合した。しかしながら、今回のケースは杭間隔が広く群杭効果が出にくい状況にあったと推察されるため、今後更なる検証が必要と考えられる。
- 3) 地盤の非線形性を試験結果によらず、建築基準法の別表値によった場合、上部建物の応答評価に関する影響は小さいが、杭応力評価に関しては、最大減衰定数 h_{max} については影響が小さいものの基準値 $\gamma_{0.5}$ については結果に少なからず影響を与えるので注意が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，(2001.10)
- 2) 西村昭彦：地盤変位を考慮した構造物の設計，基礎工，Vol.6，No.7，pp. 48～56，(1978.7)
- 3) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用，(1996.4)
- 4) 茶谷文雄，他：兵庫県南部地震で被災したRC杭の被害分析，大林組技術研究所報，No.57，pp. 5～10，(1998.7)
- 5) 水野二十一，他：液状化過程における杭基礎の動的挙動-大型せん断土槽を用いた振動台実験-，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，第2分冊，pp. 1635～1640，(1998.11)
- 6) 宮本裕司，他：液状化地盤における杭基礎の地震時杭応力に関する研究 杭基礎の遠心模型実験と解析的検討，日本建築学会構造系論文集，第482号，pp. 53～62，(1996.4)
- 7) 建設省：建設省告示第1461号，(2000.5)
- 8) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会特定研究課題1-SWG1，日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会：1995年兵庫県南部地震強震記録資料集，(1996.1)
- 9) 藤森健史，他：動的地盤ばねの周波数依存性を考慮し



(a) Small earthquake (b) Great earthquake
Fig. 13 杭最大曲率分布

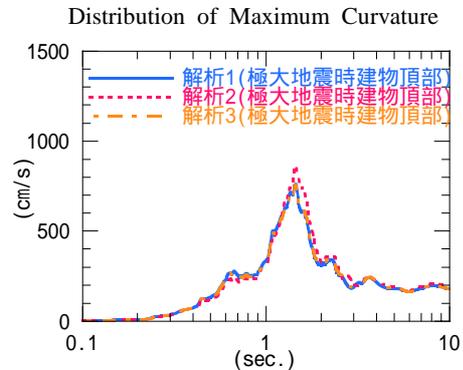
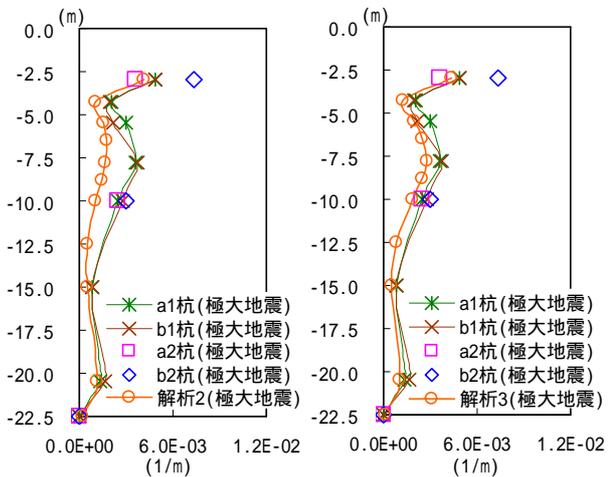


Fig. 14 速度応答スペクトル
Response Spectrum



(a) $\gamma_{0.5}=4.0 \times 10^{-4}$, $h_{max}=27.7\%$ (b) $\gamma_{0.5}=\text{test result}$, $h_{max}=27.7\%$
Fig. 15 杭最大曲率分布

Distribution of Maximum Curvature

た群杭基礎構造物の非線形地震応答解析法，大林組技術研究所報，No.56，pp. 9～14，(1998.1)

- 10) 栗本修，他：周辺地盤の液状化および杭の非線形性を考慮した杭支持建物の地震応答解析，大林組技術研究所報，No.60，pp. 73～80，(2000.1)
- 11) 建設省：建設省告示第1457号，(2000.5)